جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره بیست و نهم، بهار ۱۳۹۸

صص ۲۳– ۱

DOI: https://doi.org/10.22067/geo.v0i0.71338

بررسی رفتار آشوبناک فرایندهای ژئومورفولوژیکی حوضهٔ آبریز قزل‌اوزن

غلام حسن جعفری[1]- دانشیار ژئومورفولوژی دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

هژیر محمدی- کارشناسی ارشد هیدروژئومورفولوژی دانشگاه زنجان، زنجان، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۹ تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۷/۱۶

چکیده

ژئومورفولوگ‌ها معمولاً به‌عنوان یک اصل ضروری به تشریح گذشته و حال پرداخته و آینده فرایندها را پیش‌بینی می‌کنند تا ماهیت و سرعت تغییرات را درک نمایند. آشوب به معنای نظم در بی‌نظمی است. این پژوهش بر مبنای مطالعات کتابخانه‌ای و میدانی، سعی دارد رفتار آشوبناک فرایندهای ژئومورفولوژیکی حوضهٔ آبریز قزل‌اوزن را موردمطالعه قرار دهد. به این منظور تغییرات سطح اساس، اسارت و انحراف رودخانه، قطع ناگهانی سطوح تراکمی، مخروط‌های‌افکنه متداخل، سلول‌های هیدروژئومورفولوژیکی، دومینوی ژئومورفولوژیکی، گنبدهای نمکی و ضریب فرسایش قهقرایی در زیرحوضه‌های قزل‌اوزن موردمطالعه قرارگرفته است. نتایج نشان می‌دهد که آثار تغییرات سطوح اساس محلی در دو ژئونرون بیجار و زنجان‌رود به‌صورت سطوح تراکمی منعکس‌شده است. همین تغییرات منجر به اسارت و انحراف رودخانه‌های قلعه‌چای، مهرآباد و انگوران چای شده است. تغییر سطوح اساس در ژئونرون طارم در دو طرف قزل‌اوزن بیش از ۱۰ مخروط‌افکنه متداخل برجای گذاشته است. شبکه ژئونرونتیکی حوضه از عوامل مختلفی متأثر شده که از تجمع آن‌ها به‌عنوان سلول یادشده است. توزیع سلول‌های لیتولوژیکی و تکتونیکی موجب فرسایش خطی یا خط در سطح رودخانه شده است. انرژی ناشی از تغییرات سطح اساس برون حوضه‌ای، از بالاترین رتبه آبراهه یک حوضه، مانند مهره‌های دومینو تا آبراهه‌های رتبه یک منتقل می‌شود. در برونزد گنبدهای نمکی قزل‌اوزن، علاوه بر دیاپیر و زمین‌ساخت، کاوش و حفر رودخانه‌های حوضه قزل‌اوزن نقش اساسی داشته‌اند. بعد فرکتال بین ۱ تا ۲ اکثر زیرحوضه‌ها حاکی از فرکتال خط در سطح است. بعد فرکتالی بالاتر از ۲ در بقیه زیرحوضه‌ها، دال بر فرکتال در سطح است. میانگین ضریب فرسایش قهقرایی در رتبه یک آبراهه‌های زنجان و طارم دلالت بر تخلیه ماده و انرژی ژئونرون طارم به‌صورت خطی دارد.

کلیدواژه: ژئونرون، سطح اساس، دومینو، آشوب، تعادل، گنبد نمکی، سلول ژئومورفیک

---

۱ نویسنده مسئول: ۰۹۱۷۷۵۱۹۲۲۷ Email: jafarihas@znu.ac.ir

۱. مقدمه

تئوری آشوب برای اولین بار در سال ۱۹٦۵ توسط ادوارد لورنز در هواشناسی به کار رفت وی آن را بـه یـک علـم تبدیل کرد (کرم، ۱۳۸۹). کیاس[1] در لغت به معنی درهم‌ریختگی، آشفتگی و بی‌نظمی است و متـرادف آن در مکانیـک تلاطم[2] است؛ این واژه به معنی فقدان هرگونه ساختار یا نظم است معمولاً در محـاورات روزمـره، آشـوب و آشـفتگی نشانه بی‌نظمی و سازمان نیافتگی است و جنبه منفی در بردارد (سید جوادین، ۱۳۸۸). Poincaré در سـال ۱۹۱۳ اولـین کسی بود که ثابت کرد مسئله سه جسم، مسئلهٔ آشوبناک و غیرقابل‌حل است. مسـئلهٔ سـه جسـم بـه محاسـبه و تعیـین مدار حرکت قمرهای طبیعی به دور یک سیاره اشاره دارد. پوانکاره بیان کرد که اگـر یـک قمـر دوم بـه قمـر اول یـک سیاره اضافه شود، به دلیل اعمال نیروی غیرخطی جاذبهٔ سه جسم بر یکـدیگر، محاسـبهٔ مـدار حرکـت قمرهـا مسـئله آشوبناک و غیرقابل‌حل می‌شود. اگرچه از دیدگاه فلسفی چنین مفهومی بیشتر به یک مغالطه شـبیه اسـت ولـی انـدکی بعد از بیان این تئوری، چنان رشد و گسترشی یافت که بر مبنای یافتـه‌های Tsonis (۱۹۸۹) بعـد از تئـوری کوانتـوم و نسبیت مهم‌ترین کشف علمی در قرن بیستم تلقی می‌شود. علت اصلی شکل‌گیری چنین مفهومی مشـاهده پدیـده‌های به‌ظاهر تصادفی و غیرقابل‌پیش‌بینی در سیستم‌های جبری ساده بود. تفحص و دقت بیشتر در این موارد محققـان را بـه این نتیجه هدایت کرد که حالات آشفته و بی‌نظمی که در رونـد معادلـات جبـری دیـده می‌شـود، خـود واقعیت‌هـایی هستند که اگرچه با تکنیک‌های ساده جبری و تعینی قابل‌فهم نیستند ولـی نحـوه تغییـر و وقـوع آن‌هـا بـا تکنیک‌هـای غیرخطی، قابل‌فهم و نظم درونی آن‌ها کشف شدنی است (رامشت، ۱۳۸۲). پدیـده‌های نـاهموار بـا اشـکال نـامنظم و بی‌قاعده، از اصول هندسه اقلیدسی پیروی نمی‌کنند؛ هندسه‌ای که برای ایـن پدیـده‌ها و ابعـاد ناصـحیح آن‌هـا بـه کـار می‌رود هندسه فرکتال[3] نامیده می‌شود. هندسه فرکتال یکی از مهم‌ترین روش‌های ساختاری اسـت کـه بـا تعیـین بعـد فرکتال ساختارهای خطی مثل گسل، آبراهه و مسیر پـرپیچ‌وخم رودخانـه، می‌تـوان بسـیاری از خصوصـیات آن‌هـا را تخمین زد (Turcotte, 1992). یـک فرکتـال بـه‌عنوان یک‌شـکل هندسـی، بـه‌طورکلی دارای خصوصـیاتی اسـت: ۱- خاصیت خود همانندی دارند ۲- در مقیاس خرد بسیار پیچیده هستند. ۳- بعد آن‌ها یـک عـدد صـحیح نیسـت؛ زیـرا الگوهای فرکتالی تحت دامنه محدودی از مقیاس‌ها گسترش می‌یابند (Bass, 2002). مطابق نظریه آشوب، پدیـده‌هـای طبیعی همچون رودخانه که در ظاهر دارای پیچیـدگی و بی‌نظمـی اسـت، بـا اسـتفاده از روابطـی در هندسـه درختـان فرکتالی می‌توان آن را منظم و بر اساس روال و منطق خاصی تعریـف کـرد (Ariza et al, 2013). در قـزل‌اوزن وجـود مخروط‌افکنه جدید در قاعده مخروط‌های‌افکنه قدیمی، گالی، لندفرم‌های نامتعادل و... نشان‌دهنده تغییـر سـطح اسـاس و تکتونیک فعال در منطقه است. عامل اصلی ایجاد ناتعـادلی تغییـرات سـطح اسـاس اسـت کـه به‌صـورت فرسـایش

1 Chaos
2 Turbulance
3 Fractal

قهقرایی در رودخانه‌ها و آبراهه‌ها منعکس‌شده است. پدیده‌های اسارت و انحراف تخلیه دریاچه‌های یخچالی از تغییرات و ناتعادلی در حوضه می‌باشد. فرسایش خطی و سطحی و ترکیبی از هردو در مناطق مختلف حوضه و مسائلی از این قبیل مبنای طرح بررسی حوضه در یک مدل آشوبناک گردید

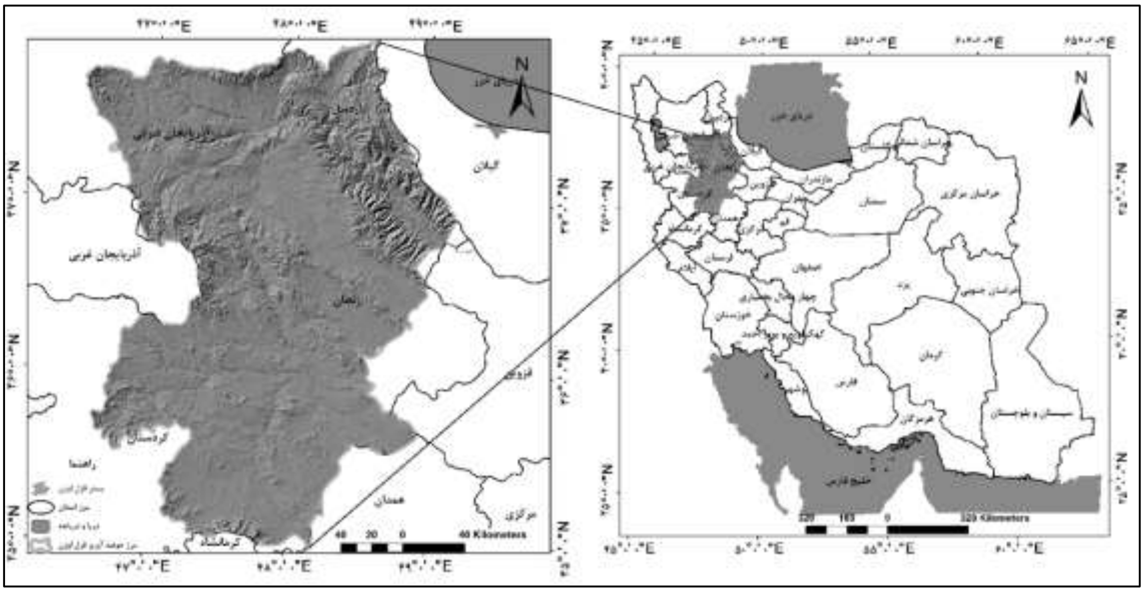
Phillips(۱۹۹۳)، در یک پژوهش با بررسی دامنه آشوبناک مناظر ویژه به این نتیجه رسید که پیشرفت در تحلیل رفتار پرآشوب می‌تواند کلید یک نظریه در حال تکامل چشم‌انداز باشد که حضور هم‌زمان و به‌ظاهر تصادفی و نامنظم را برای ارائه الگوهای منظم فراهم می‌سازد. Nicolis (۱۹۸۷) معتقد است که از بین انواع فرسایش خاک، فرسایش قهقرایی تأثیرگذارترین نوع فرسایش در وقوع پدیده اسارت رود است. Zhou و همکاران (۲۰۰۲) دینامیک آشوبناک سری جریان را در حوضه آبریز رودخانه هیواهی[1] برای ۵۰۰ سال گذشته را بررسی کرده است. فیلیپس (۲۰۰۶)، در مطالعه منطقهٔ ایسکارپمنت[2] در شرق کنتاکی[3] ایالات متحد آمریکا با استفاده از داده‌های فضایی، لندفرم‌ها را با استفاده از تکنیک آشوب طبقه‌بندی کرد. افزایش تکامل در مقابل کاهش بی‌نظمی به‌عنوان معیار در نظر گرفته شد، افتراق بین دستیابی به حالت پایدار جدید و واگرایی ناپایدار به‌عنوان رفتار پیچیده غیرخطی در نظر گرفته شد. Turcotte (۲۰۰۷) رفتار فرکتالی حوضه‌های آبریز را در الگوی آبراهه‌ای موردبررسی قراردادند. Dombrádi و همکاران (۲۰۰۷) بعد فرکتالی در سیستم شبکه زه کشی کارپات[4]، Jianhua و همکاران (۲۰۰۹) رواناب سالانه سرچشمه رود تاریم[5] را در سیستم‌های غیرخطی پیچیده یا فرکتال و Frascati and Lanzoni(۲۰۱۰) رودخانه طولانی مآندر را به‌عنوان رفتاری آشوبناک با استفاده از مدل‌سازی ریاضی ارزیابی کردند. Pedersen and Hades (۲۰۱۱)، در تحقیقی درباره آشوب منطقه الیسیم ریس[6] در مریخ به این نتیجه رسیدند که گدازه‌ها رفتار ای آشوبناک و بی‌نظم دارند. صادق موحد در تجزیه‌وتحلیل فرکتال نوسانات جریان رودخانه دریافتند که دو بازه زمانی متقاطع وجود دارد که با توجه به فصلی بودن، می‌تواند ناشی از فرکتال طبیعت باشد. Bi و همکاران (۲۰۱۲) خصوصیات فرکتال لندفرم‌های زمین بر مبنای شبکه‌های رودخانه‌ای آشوبناک را بررسی و دریافتند که تغییرات ویژه خواص فرکتالی پستی‌وبلندی‌ها را نشان می‌دهند. Milliman and Syvitski(۲۰۱۳) در بررسی ژئومورفولوژی- زمین‌ساخت در کنترل رسوب دریایی به اهمیت رودخانه‌های کوچک کوهستانی پی بردند. رامشت (۱۳۸۲)، به بررسی‌های نظری آثار یخچالی در دامنه‌های جنوب غربی زفره و مقایسه آن با دامنه‌های شمال شرقی این منطقه، به تبیین مبانی تئوری کیاس و تطبیق آن در ژئومورفولوژی پرداخت و حوزه کاربردی آن را در این بخش از علوم جغرافیائی دنبال کرد. شقاقیان و بیدختی (۱۳۸۸)، در بررسی داده‌های جریان ایستگاه آب‌سنجی واقع در رود آنکوپاگر در کلنا، ایالت

1 Hivahi
2 Ayskarpmnt
3 Kentucky
4 Karpat
5 Tarime
6 Alysym Reese

کولورادو با استفاده از شاخص بعد همبستگی، نتیجه گرفت که جریان رود در مقیاس‌های زمانی کوچک (۱۵ دقیقه‌ای) رفتاری کاملاً آشوبی، در مقیاس‌های زمانی بزرگ (هفتگی) رفتاری کاملاً تصادفی و در مقیاس‌های میانی رفتاری بین این دو داشته است. کرم (۱۳۸۹)، با استفاده از نظریهٔ آشوب بین فرم (بعد فرکتال) و فرایند (خودسازماندهی) در پدیده‌های ژئومورفولوژیک روابطی برقرار کرد. علمی زاده و شایان (۱۳۹۰)، در تبیین نظریه آشوب در ژئومورفولوژی جریانی، پس از تشریح برخی مفاهیم، به این نتیجه رسیدند که مسیرهای قبلی رود کَل، با فرایندهای امروزی در تعادل نیست و بیانگر نوعی بی‌نظمی در رابطه بین پاسخ فرم و فرایند است. قاهری و همکاران (۱۳۹۱)، در بررسی حوضه اهرچای، با استفاده از الگوریتم پیش‌بینی موضعی، جهت پیش‌بینی سری زمانی، از معیارهای ترازیابی، ضریب همبستگی، جهت سنجش دقت مدل استفاده کردند. نتایج حاصله حاکی از دقت قابل‌قبول و مناسب بودن نظریه آشوب در پیش‌بینی جریان رودخانه اهرچای است. انیس حسینی و ذاکر مشفق (۱۳۹۲)، در مطالعه جریان رودخانه کشکان با استفاده از روش‌های تخمین هسته گوسی و تبدیل موجک و هم‌چنین رفتار آماری سری زمانی با توابع همبستگی و خودهمبستگی جزئی، نتیجه گرفتند که کارایی روش‌های مبتنی بر نظریه آشوب برای تحلیل و پیش‌بینی جریان رودخانه در حوضه آبریز رودخانه کشکان مناسب است. داداش زاده و همکاران (۱۳۹۳)، یکی از تأثیرات مهم هم‌جواری حوضه‌ها را وقوع پدیده فرسایش قهقرائی و به دنبال آن رخ دادن پدیده اسارت دانستند و معتقدند چاله اردبیل نیز از این قاعده مستثنا نبوده و تحت تأثیر حوضه مجاور خود در شرف وقوع پدیده فرسایش قهقرائی است که در ادامه به اسارت و انحراف شبکه اصلی زهکش‌های این دریاچه قدیمی خواهد انجامید. علمی زاده و همکاران (۱۳۹۳)، در بررسی رودخانه زرینه‌رود با اتکا به روش شاخه بندی هورتن–استرالر و توکوناگا و با محاسبه طول شاخه‌ها، بعد فرکتالی آن را محاسبه و نتیجه گرفتند که شاخه اصلی این رودخانه دارای مرتبه چهارم بوده و بعد فرکتالی بالای رودخانه معرف تراکم زهکشی بیشتر و نیاز به زمان کمتر برای رسیدن به جریان دائمی است. فهیم فرد و همکاران (۱۳۹٤)، در مطالعه سد کرج با روش بازسازی فضای فازی و بعد همبستگی، به بررسی پویایی انتقال رسوب از دیدگاه آشوبی و همچنین تأثیر وجود سد بر تغییرات این الگو پرداختند و نتیجه گرفتند که گروه زمانی رسوب دارای الگوی آشوبی کم دامنه است و در بازهٔ زمانی کوتاه‌مدت ده‌روزه، سد بر پویایی آن مؤثر بوده و آن را از پدیده آشوبی به تصادفی تبدیل کرده است، اما در بازه زمانی بلندمدت‌تر مانند ماهانه به دلیل خلق اطلاعات و قطع ارتباط با شرایط اولیهٔ که در سامانه‌های آشوبی رخ می‌دهد، این تأثیر از بین رفته و گروه زمانی دوباره رفتار آشوبی به خود می‌گیرد. خسروی و همکاران (۱۳۹۵) رفتار فرکتالی حوضه‌های آبریز را در الگوی آبراهه‌ای موردبررسی قراردادند. نتایج حاصل از این پژوهش مشخص‌کنندهٔ روابط معناداری بین ابعاد فرکتال حوضه‌ها، شبکه‌های زهکشی، فرم‌ها، الگوهای نهایی و خصوصیات مورفومتری آن‌ها می‌باشد.

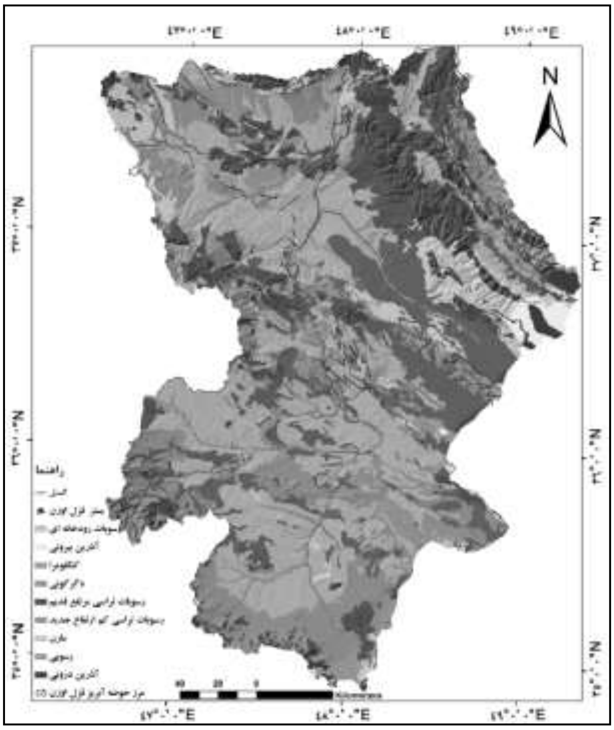
۲. منطقهٔ موردمطالعه

حوضهٔ آبریز قزل‌اوزن ازجمله زیرحوضه‌های دریای خزر می‌باشد که از ارتفاعات چهل چشمه کردستان سرچشمه گرفته و بعد از وارد شدن به چالهٔ بیجار از طریق تنگ‌های ماه‌نشان، رجعین، هشتجین وارد طارم شده و به دریاچه سد منجیل می‌ریزد و درنهایت پس از پیوستن شاهرود به سفیدرود پیوسته و وارد دریاچه خزر می‌شوند. این حوضه در استان کردستان، زنجان، آذربایجان شرقی، اردبیل، همدان و بخش کوچکی از استان‌های قزوین، آذربایجان غربی و گیلان قرارگرفته و در عرض‌های جغرافیایی ۳٤ درجه و ۵۵ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۵۵ دقیقه عرض شمالی و ٤٦ درجه و ۲۷ دقیقه تا ٤۹ درجه و ۲۰ دقیقه طول شرقی گسترده شده است. طول این رودخانه از سرچشمه تا خروجی حوضه ۵۵۰ کیلومتر و مساحتی بالغبر ٤۹٤۰۰ کیلومترمربع است و بالاترین و پایین‌ترین ارتفاع آن به ترتیب ۳٦۱۰ و ۲۳۹ متر از سطح دریا است (شکل ۱).



شکل ۱- موقعیت منطقهٔ موردمطالعه

حوضهٔ آبریز رودخانه قزل‌اوزن، یک حوضهٔ کوهستانی و متشکل از دشت‌های آبرفتی و تپه‌ماهورهایی با رسوبات مارنی و سازندهای کم مقاومت در مقابل عوامل فرسایشی است. سازندهای زمین‌شناسی مسیر این رودخانه شامل: ائوسن، میوسن، پرکامبرین و نهشته‌های کواترنری است همچنین عمده لیتولوژی حوضه مربوط به مارن‌های ماسه‌ای آهکی و رسوبات رودخانه‌ای است (رضایی مقدم و همکاران، ۱۳۹۱) (شکل ۲). وجود گسل‌ها در شبکهٔ آبراهه‌ای نقش مؤثری دارند. روند اکثر این گسل‌ها شمال غرب – جنوب شرق است (پورکرمانی و آرین، ۱۳۷۸).



شکل ۲- موقعیت سازندهای زمین‌شناسی حوضه آبریز قزل‌اوزن

۳. مواد و روش‌ها

در این تحقیق جهت بررسی بعد آشوبناک محدوده موردنظر ابتدا مدل رقومی ارتفاع ۳۰*۳۰ متری منطقه از ماهواره SRTEM استخراج می‌گردد و با استفاده از نرم‌افزار آرک جی.آی. اس، لایه کانتوری منطقه موردنظر، به دست آمد. هم‌چنین با اتکا بر نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ منطقه موردمطالعه، آبراهه‌ها استخراج و در نرم‌افزار آرک جی.آی. اس رقومی، الگوی آن‌ها مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفت. لایه لیتولوژی با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ و ۱:۲۵۰۰۰۰ رقومی گردید. شبکهٔ آبراهه‌ها با کمک مدل رقومی ارتفاع منطقه استخراج گردید. از وجود سازندهای آبرفتی جدید در پای مخروط‌های‌افکنه قدیمی، افتادگی در مسیر رودخانه‌ها، توالی مخروط‌های‌افکنه، تغییر مسیر آبراهه برای تحلیل تغییرات سطح اساس استفاده شد. رتبه‌بندی استرالر یا رتبه‌بندی هورتون- استرالر روشی برای رتبه‌بندی آبراهه‌ها و رودخانه‌هاست که رتبه‌بندی شاخه رودها بر اساس آن در یک سیستم زهکشی حوضه آبریز، آبراهه اصلی از ترکیب رده‌های اول، دوم، سوم و رده‌های بعدی تشکیل می‌شود. در این روش، شاخه رودهای کوچک می‌تواند در سرنوشت رتبه یا زهکش اصلی که آب‌ها را از منطقه خارج می‌کند مؤثر باشد (رامشت، ۱۳۷۵). سپس تعداد کل آبراهه‌های مرتبهٔ i ام (ni) برای یک درخت فرکتالی از مرتبهٔ n با رابطه (۱) به دست می‌آید: نسبت انشعاب هورتن از رابطهٔ (۲) و نسبت طولی مرتبه از رابطه (۳) محاسبه می‌شود که در روابط مذکور Ni تعداد

آبراهه مرتبه i ام و ri طول متوسط آبراهه مرتبه i ام است. مقادیر مستقل از مرتبـه، بـرای شـبکه زهکشـی تقریبـاً ثابـت هستند. با استفاده از بعد فرکتالی (D) برای شبکه‌های زهکشی، رابطهٔ (٤) بین طول و مرتبه شبکه برقرار اسـت (عملـی زاده، ۱۳۹۳ به نقل از تارکوت، ۳۰۸:۲۰۰۷).

رابطه ۱: $Ni = \sum_{i}^{n} = 1^{Nij}$

رابطه ۲: $Rb = \frac{Ni}{Ni+1}$

رابطه ۳: $Rr = \frac{ri+1}{ri}$

رابطه ٤: $D = \frac{lnRb}{lnRr}$

مطالعات میدانی متعدد دال بر وجود نوعی پالیمسست در چشم‌انداز بخش‌هایی از حوضه قـزل‌اوزن بـود. بـه ایـن معنی که ایجاد لندفرم‌های منطقه را نمی‌توان بر اسـاس شـرایط کنـونی تبیـین نمـود. آثـار شـرایط اصـلی شـکل‌گیری لندفرم‌ها در فرم بعضی از قسمت‌های حوضه منعکس‌شده بود. این قسـمت‌ها سـطوح کـم عارضـه‌ای هسـتند کـه در مجاورت سطوح پر عارضه قرارگرفته‌اند. سطوح کم‌عرضه در نقشه‌های توپوگرافی با خطوط منحنـی میـزان سینوسـی ساده و صاف منعکس‌شده است درصورتی‌که سطوح نامتعادل و پر عارضـه دارای منحنـی میزان‌هـای پنجـه‌ای و بـای مدال هستند. بر این اساس برای بازسازی توپوگرافی گذشته خطوط منحنی میزان‌های سینوسی سـاده و صـاف در بـین منحنی میزان‌های پنجه‌ای و بای مدال، رقومی شد. ارتفاع خطوط منحنـی میـزان نامتعـادل (پنجـه‌ای و بـای مـدال) در بخش‌های مختلف، بـر اسـاس ارتفـاع خطـوط متعـادل بازسـازی گردیـد. مسـیر پدیـده‌هـای انحـراف و اسـارت در بررسی‌های میدانی شناسایی شد. با حذف مختصات جغرافیایی مسیر جدید رودخانـه‌ها در جـدول اطلاعـاتی نرم‌افـزار سورفر، به کمک مختصات جغرافیایی مناطق باقی‌مانده، توپوگرافی گذشته بازسازی شد. خروجـی توپـوگرافی گذشـته به نرم‌افزار گلوبال‌مپر منتقل شد. در آن نرم‌افزار لایه رودخانه‌ها استخراج گردید و به این وسیله میسـر قبلـی رودخانـه‌ها بازسازی شد.

آبراهه‌های شعاعی همگرا به‌عنوان سطوح دریاچه‌ای در نظـر گرفتـه می‌شـود. در منطقـه چنـدین مکـان بـا شـبکه آبراهه‌های همگرا شناسایی شد که هرچند در شرایط کنونی سطوح باز بوده و آب از آن‌ها خارج می‌شود ولـی شـواهد ژئومورفولوژیکی موجود دال بربسته بودن حوضه‌ای آن‌ها درگذشته است.

یکی از عوامل دیگری که بر رفتار آشوبناک حوضه قزل‌اوزن اثر گذاشته است فعالیت گنبدهای نمکی اسـت. بـرای تأیید و تعیین گنبدهای نمکی، بازدیدهای میدانی متعددی انجام شد. موقعیت مناطق موردنظر بـا دسـتگاه موقعیـت یـاب جهانی ثبت شد ودادهای مربوطه وارد نرم‌افزار اکسل گردید. در ادامه در آرک جی.آی. اس لایهٔ نقطه‌ای اسـتخراج و حجـم گنبدهای نمکی محاسبه گردیـد. جهـت بررسـی بیشـتر، لایـه شـبکه‌های آبراهـه‌ای و منحنی‌هـای میـزان در تصـاویر ماهواره‌ای ادغام شد. عمود برجهت گنبدهای نمکی پروفیل‌های متعددی ترسیم شد. تفسیر نیمرخ‌ها بادیـد سیسـتمی و

با توجه به پدیده‌ها و حوضه‌های مجاور انجام شد. برای دره رودها و حوضه‌ها با استفاده از رابطه (۵) ضریب قهقرایی محاسبه شد.

رابطه ۵: $CR\frac{LRT}{LRA}.D.U.W$

LRT طول مسیر رودخانه اصلی، LRA طول رودخانه به خط مستقیم و D.U.W فاصله سرچشمه تا خط تقسیم حوضه است. پروفیل‌های متعددی در اطراف ژئونرون‌ها ترسیم گردید تا مقدار اختلاف ارتفاع و پائین افتادگی مناطق برآورد گردد. نرون به گره‌های موجود در شبکهٔ عصبی گفته می‌شود که وظیفهٔ دریافت، پردازش و انتقال اطلاعات رادارند (خاشعی سیوکی و همکاران، ۱۳۹۲). این واژه در ژئومورفولوژی با عنوان ژئونرون خوانده می‌شود. خطوط آبراهه‌ای که ارتباط‌دهندهٔ ژئونرون‌ها هستند با عنوان آکسون‌های برداری شناخته می‌شوند. در شبکه‌های زهکش رودخانه‌ای ارتباط بین ژئونرون‌ها یک‌طرفه است، لذا برای بیان این ویژگی، کاربرد واژهٔ بردار، یک‌طرفه بودن جریان در این معابر است (امیر احمدی و احمدی، ۱۳۹٤). محل اتصال آکسون‌های برداری با ژئونرون‌ها و یا محل تقاطع آکسون‌های برداری، سیناپس ارضی گفته می‌شود (رامشت، ۱۳۸۵). برای اندازه‌گیری حجم مواد تخلیه‌شده از مدل رقومی ارتفاع ژئونرون‌ها به تفکیک برش داده شد.

٤. نتایج و بحث

تعادل ازجمله واژه‌هایی است که در دیدگاه آشوب مفهوم خاصی دارد. آشوب، تعادل را به‌نوعی نظم در بی‌نظمی بیان می‌کند. در تعادل ژئومورفولوژیکی فرایندهای بیرونی، درونی و ترکیبی از هردو تأثیر می‌گذارند. سطح اساس یک رودخانه و سرشاخه‌هایش یکی از اصلی‌ترین پارامترهایی است که تجزیه‌وتحلیل حوضه‌های زهکشی بدون در نظر گرفتن آن امکان‌پذیر نیست. عدم وحدت حوضه آبی قزل‌اوزن در اوایل کواترنری به معنی وجود ژئونرون‌های متفاوتی است که خود به‌صورت مستقل محل تجمع ماده و انرژی بوده که در شرایط کنونی هرچند با ویژگی‌های مئاندری، آبراهه‌های گیسویی و آبراهه‌های دوشاخه‌ای غیر هم‌سطح مشخص می‌شوند ولی درگذشته به‌صورت سطوح اساس محلی بوده‌اند. این‌گونه سطوح اساس محلی در شرایط کنونی از طریق تراس‌های رسوبی قابل‌شناسایی و ردیابی است. وجود تنگ‌های متعدد ازجمله: ماهشان، هشتچین، رجعین، اندآباد، قمچقای، میانه– طارم و بابارشانی و سطوح تراکمی وابسته به آن‌ها در بیجار: حسن‌آباد یاسوکند، مسجدلر، زرین‌رود، گرماب، جاده بیجار و پول کشتی در زنجان مهرآباد، قلعه‌چای و رجعین، دال بر وجود ژئونرون‌های متعدد در قزل‌اوزن است. در حوضه‌های آبریز تجمع رواناب‌ها پیرامون نقاطی به‌صورت بردار یک‌طرفه، کانون‌های همگرا یا ژئونرون نامیده می‌شوند که منجر به ایجاد خازن‌هایی در آن محل می‌شود؛ این خازن‌ها محل تجمع رواناب‌ها است (رامشت و شاهزیدی، ۱۳۹۰). شبکه آبراهه همگرای نقطه‌ای حاکی از ورود آب کل حوضه به یک ژئونرون است. مراکز همگرایی شبکه‌های آبراهه‌ای حوضه‌های مختلف جایی است که ژئونرون (دریاچه) گفته می‌شود. در حوضهٔ آبریز قزل‌اوزن چند کانون همگرای

شبکه آبراهه‌ای شناسایی شدند که در ذیل به آن‌ها اشاره می‌شود: بیجار، زنجان، میانه و طارم که هرکدام نمایانگر یک دریاچه قدیمی هستند و حوضه‌های مجاور آن‌ها به این مناطق تخلیه می‌شده‌اند. آب ٦ زیرحوضه یول کشتی، قروه و دهگلان، سجاس‌رود، انگوران چای، حسن‌آباد یاسوکند و گرماب در ژئونرون بیجار تخلیه می‌شده است. چاله زنجان آبراههٔ زیرحوضه‌های زنجان‌رود، تلخه‌رود، قلعه‌چای را دریافت می‌کرده است. زیرحوضه‌های قرنقوچای، گندوغدی در چاله میانه و زیرحوضه‌های گیوی چای، زاویه جعفرآباد، چورزق و چند زیرحوضهٔ دیگر در طارم همگرا بوده‌اند (شکل ۳). مقدار تخلیهٔ رسوبات که در هر یک از ژئونرون‌ها اتفاق افتاده تابعی از لیتولوژی، انرژی واردشده و شکل فیزیوگرافی ژئونرون بوده است. به‌طوری‌که لیتولوژی در سه ژئونرون بیجار، زنجان و طارم به گونه است که بهترین شرایط را برای فرسایش فراهم نموده است و وضعیت هم‌جواری لیتولوژی‌های مقاوم با لیتولوژی سست در طارم شرایط را برای فرسایش خطی بسیار مساعد نموده است. وقتی نیرویی در بالادست آزاد شود در پائین‌دست بیشترین تأثیر را می‌گذارد. در قزل‌اوزن زمانی که بیجار در طی سه مرحله تخلیه می‌شود ژئونرون‌های زنجان و میانه در مرحله بعد از ژئونرون بیجار پاره شده و حجم گسترده‌ای از انرژی و ماده را به‌طرف خروجی حوضه یعنی طارم هدایت‌شده است.

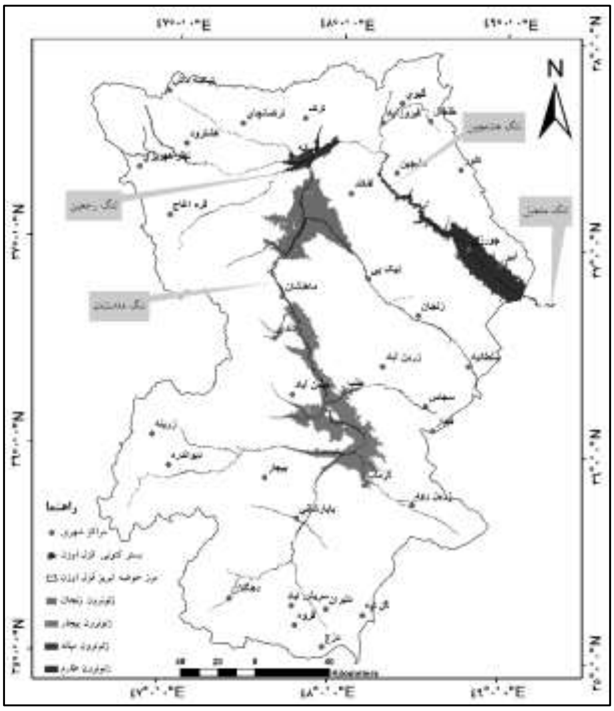


شکل ۳- شواهد تغییرات سطح اساس

طارم با واقع‌شدن در پایاب حوضه قزل‌اوزن، با دریافت بیشترین ماده و انـرژی به‌شـدت تخلیه‌شـده اسـت. شـکل فیزیوگرافی ژئونرون‌ها نیز وضعیت تخلیه مواد را مشخص می‌سازد به‌گونه‌ای که در حوضـه‌های کشـیده تخلیـه مـواد بیشتر در خط اتفاق می‌افتد تا در سطح و در حوضه‌های پهن برعکس. در حوضه کشیده (تمرکـز فرسـایش در خـط) نیروها متمرکز می‌شوند و حفر را بیشتر انجام می‌دهند اما در شکل پهن تمرکز فرسایش در سـطح اتفـاق می‌افتـد و در سطح به‌صورت پراکنده تخلیه انجام می‌شود که به پخش انرژی در سطح و تخلیه کم مواد در عمق منجـر می‌شـود. در چنین حالتی آثار سطح قبلی به‌صورت تپه شاهدهای متعددی در منطقه باقی می‌ماند (جدول ۱) (شکل ٤).

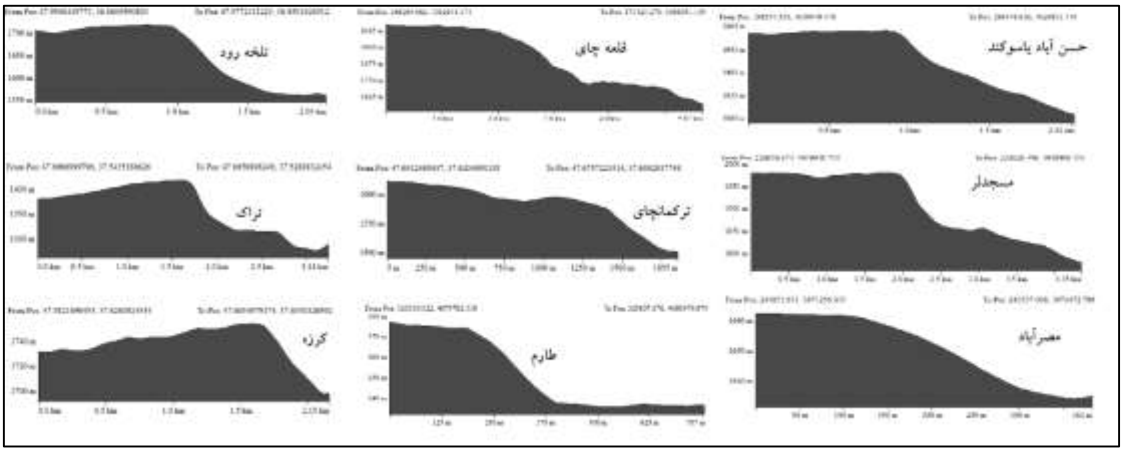
جدول ۱- حجم تخلیه ماده در ژئونرون‌ها

نام ژئونرون	حجم تخلیه ژئونرون M3	حجم تخلیه در واحد سطح M
مرحله اول تخلیه بیجار	۲۰٥٤٥٦٦۹۳۷	۱/۳۲
مرحله دوم تخلیه بیجار	۹٤۰۳۸٦٥۹٦۲۹	٦۰/۷۸
مرحله سوم تخلیه بیجار	٤۸۷٦٦٦٤۹۰٥۷	۳۱/٥۲
زنجان یک مرحله تخلیه	۹٦۱۹٥٦٤٤٥۸۳	۹۱/٥۲
میانه یک مرحله تخلیه	۱۳٤۲۱٥۳۳۱۲٥	٦٤/٥۲
یک مرحله طارم	۲۲۹٤٤۳۸۰٥٤۱٦	۳٤٥/۳۷

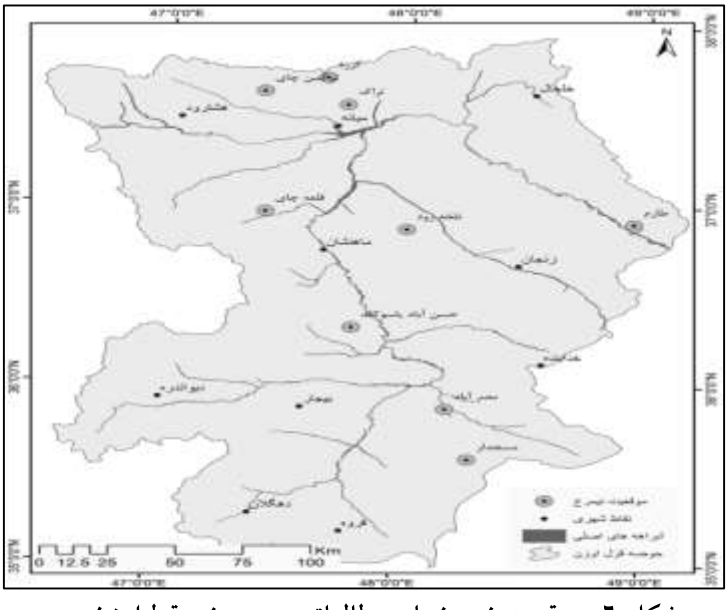


شکل ٤- موقعیت ژئونرون‌های شناسایی شده در قزل‌اوزن

نیمرخ‌های متعدد ترسیم‌شده عمود بر رودخانه قزل‌اوزن، دال بر پائین افتـادگی ناگهـانی در دره رودخانـه‌ها اسـت. میانگین پائین افتادگی در حوضه‌های مستقل یا ژئونرون‌های قزل‌اوزن محاسـبه گردیـد؛ کـه نشـان‌دهنده آن اسـت کـه تغییر سطوح تراکمی در سراب قزل‌اوزن بیشتر از سایر مکان‌ها اتفاق افتاده است. آثـار تغییـرات سـطوح محلـی در دو ژئونرون بیجار و زنجان‌رود از طریق سطوح تراکمی و دشت‌های آبرفتی ردیـابی گردیـد. در ژئـونرون بیجـار سـطوح تراکمی حسن‌آباد یاسوکند، مسجدلر و گرماب شناسایی شدند (اشکال ۵ و ٦)(جدول ۲). در ایـن ژئـونرون علـاوه بـر شناسایی بالاترین تراس دریاچه‌ای در ارتفاع ۱۵٦۱ متر، ۳ تراس دیگر در ارتفاع پایین‌تر مشـاهده گردیـد کـه حـاکی از تخلیه چندمرحله‌ای این چاله است.



شکل ۵- پائین افتادگی سطوح تراکمی

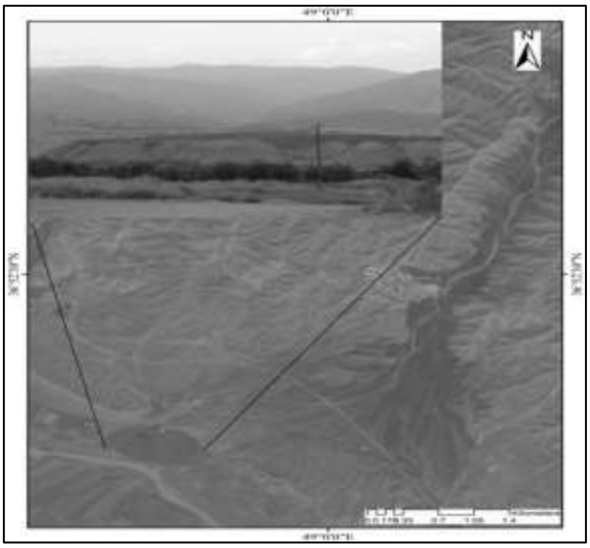


شکل ٦- موقعیت نیمرخ‌های مطالعاتی در حوضه قزل‌اوزن

جدول ۲- مقدار تأثیرپذیری تغییرات سطح اساس

نام پروفیل	میانگین پائین افتادگی (متر)	نام پروفیل	میانگین پائین افتادگی (متر)
تلخه‌رود	۱۵۰	طارم	٤١
قلعه‌چای	۲۰۱	مصرآباد	۱۱
حسن‌آباد یاسوکند	۱۹٤	نام ژئونرون	میانگین پائین افتادگی در ژئونرون‌ها (متر)
تراک	۱٤٥	بیجار	۱٤٤/۸
ترکمانچای	۱۱۵	زنجان	۱۷٥/٥
مسجدلر	۱۷۷	میانه	۱۲۱
کرزه	۱۰۳	طارم	۹۰/٥

بر اساس شواهد اسنادی (نقشه‌های توپوگرافی) و مشاهدات میدانی در دو ژئونرون بیجار و زنجان، اسارت‌ها و انحراف‌های ٦ زیرحوضه قلعه‌چای، مهرآباد، انگوران چای، حسن‌آباد یاسوکند، پول کشتی و سجاس‌رود شناسایی شد. تغییر سطوح اساس در چالهٔ میانه و طارم از طریق توالی مخروط‌های‌افکنه متداخل قابل‌ردیابی است (شکل ۷). در محل خروج رودخانه از کوهستان‌های دو طرف طارم، مخروط‌های‌افکنه شکل‌گرفته‌اند و با پایین افتادن سطح اساس (قزل‌اوزن) به هر دلیل، رودخانه‌ها مجبور به برش رأس مخروط‌های‌افکنه و توسعه مخروط‌افکنه جدید در قاعده مخروط‌افکنه قدیمی شده‌اند. در ژئونرون طارم بیش از ۱۰ مخروط‌افکنه متداخل شناسایی شد که مهم‌ترین آن‌ها چورزق، آب‌بر، جیا، دستجرده، تشویر، گیلانکشه، گیلوان، درام، آلتین کوش و کلج است. در ژئونرون میانه تنها مخروط‌افکنه مربوط به قرنقوچای به‌صورت کشیده و متداخل شاهدی بر پایین افتادن سطح کنونی قزل‌اوزن نسبت به گذشته است.



شکل ۷- مخروط‌افکنه متداخل در بخش طارم از حوضه قزل‌اوزن

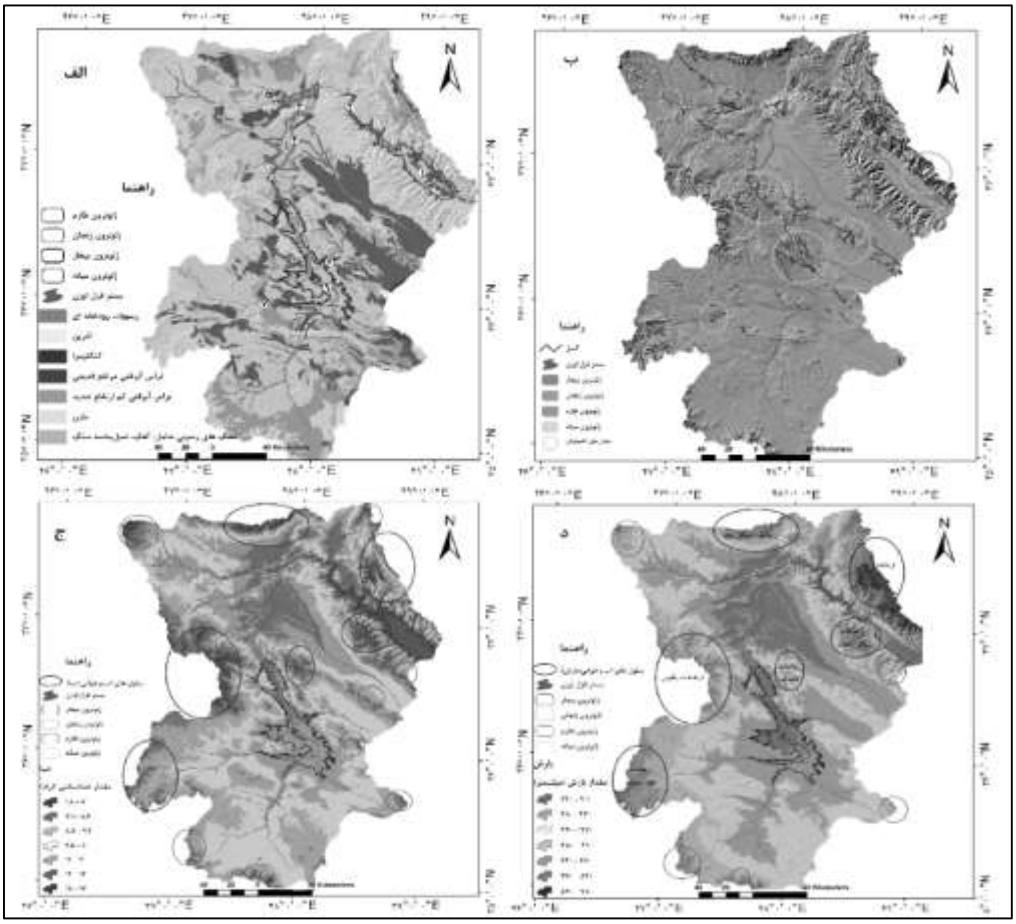
تغییرات سطح اساس، رودخانه را از مصب تا سرچشمه به‌صورت قهقرایی متأثر می‌سازد؛ مانند طنابی که وقتی ضربه‌ای به آن وارد شود فرکانس آن به شکل سینوس تا انتها ادامه می‌یابد که از آن به‌عنوان دومینو در ژئومورفولوژی یاد شد؛ با وارد شدن ضربه به مهره اول، فرکانس انرژی تا آخرین مهره منتقل می‌شود. در بررسی ژئومورفولوژیکی دومینو سؤال اساسی این است که ضربهٔ اول، از درون یا از بیرون حوضه واردشده است؟ انتقال انرژی از سطحی به سطح دیگر همیشه در یک راستا انجام نمی‌شود؛ به همین دلیل ممکن است انتقال انرژی به‌صورت خط، خط در سطح، هم در سطح و هم در خط و نهایتاً نه در سطح و نه در خط باشد. فرم ناشی از انتقال انرژی در خط برای لیتولوژی سست به‌صورت گالی، در لیتولوژی مقاوم به شکل تنگه و در هم‌جواری لیتولوژی مقاوم و سست به‌صورت تنگه نامتقارن منعکس می‌شود. پادگانه‌های آبرفتی نمونه انتقال انرژی به‌صورت خط در شرایطی است که تعداد دفعات تغییر سطح اساس کم ولی مقدار تغییر زیاد باشد. نتیجهٔ ژئومورفولوژیکی دوره‌های سرد کواترنری به شکل سه یا چهار پادگانه اصلی در اطراف رودخانه‌ها و دریاچه‌ها قابل‌ردیابی است یعنی تعداد تغییرات کم، فرم‌های پایدار و قابل‌توجه بر جاگذاشته است. اگر تعداد تغییرات زیاد و زمان برای به تعادل رسیدن محیط کم باشد، باعث ناتعادلی در فرم می‌شود. بررسی ژئونرون‌های بیجار، زنجان و طارم به‌خوبی بیان‌کننده این مطلب است که تغییر سطح اساس محلی متعدد قزل‌اوزن، مانع از متعادل شدن فرم‌ها شده است.

هرچند قزل‌اوزن از مناطق مرتفع چهل چشمه (با ارتفاع ۳۱۳۷ متر) در کوه‌های کردستان سرچشمه می‌گیرد ولی در طی مسیر از نواحی‌ای می‌گذرد که قلل مرتفع‌تری از چهل چشمه دارند (ارتفاع بلقیس ۳۶۵۵، آق داغ ۳۳۲۱ و سهند ۳۷۰۷ متر) و مساحت نواحی مرتفع نیز نسبت به سرچشمه اولیه آن بیشتر است؛ از طرفی در پایاب وارد منطقه مرطوب خزری می‌شود. از تجمع ماده و انرژی و یا داده و اطلاعات در بخشی از حوضه که بتواند رفتار ژئومورفولوژیکی رودخانه را متأثر نماید به‌عنوان سلول یادشده است. از توزیع قلل در بخش‌های مختلف حوضه، سلول‌های ژئومورفولوژیکی شکل‌گرفته است. توزیع عناصر اقلیمی در سلول‌های برودتی و رطوبتی مطرح‌شده که باعث تقویت دبی قزل‌اوزن شده و مانع از خشک شدن آن می‌شود. از توزیع لیتولوژی حوضه، سلول‌های لیتولوژیکی شکل‌گرفته است که شرایط خاصی را بر قزل‌اوزن مسلط کرده است. از سرچشمه تا پایاب، لیتولوژی مقاوم در بستر و اطراف به‌صورت چندین قطعه جدا از هم توزیع‌شده‌اند. شدت فرسایش در رسوبات سست منجر به تسریع فرسایش و کم شدن شیب شده و کاهش مقدار فرسایش در لیتولوژی مقاوم باعث کنترل سرعت عمل حفر در رسوبات سست رودخانه شده است؛ در چنین شرایطی آب در رسوبات سست وضعیت رودخانه‌های پیر (در دیدگاه دیویس) را به خود گرفته که مهم‌ترین خصیصه ژئومورفولوژیکی آن مآندر سازی است؛ درصورتی‌که در لیتولوژی مقاوم با کاهش فرسایش خطی، باعث شکل‌گیری آبشارهای متعدد در رودخانه می‌شود که بر جوان بودن رودخانه دلالت دارد.

توزیع سطوح تراکمی و کاوشی در قزل‌اوزن دلالت بر تغییر سطح اساس محلی در ژئونرون‌های بیجار، زنجان و طارم دارد به‌گونه‌ای که شیب یکنواخت سطوح تراکمی ناگهان شکسته شده و با اختلاف ارتفاع قابل‌توجه به سطوح کاوشی مسلط شده‌اند که دو چشم‌انداز متفاوت را به ارمغان آورده است: فرم‌های متعادل در سطوح تراکمی و فرم‌های نامتعادل در سطوح کاوشی. چنین وضعیتی حاکی از کنترل رفتار رودخانه توسط سلول‌های لیتولوژیکی است که باعث تخلیه ژئونرون‌ها در چندین مرحله شده است.

توزیع و امتداد گسل‌ها در حوضه قزل‌اوزن در سلول‌های تکتونیکی بحث شده است. امتداد گسل‌ها نیز به‌گونه‌ای است که شرایط خاصی را برای رفتار رودخانه قزل‌اوزن فراهم نموده است. امتداد اصلی گسل در ژئونرون بیجار عمود بر جریان رودخانه قزل‌اوزن است. با این دیدگاه می‌توان این منطقه را یک ژئونرون تکتونیکی در نظر گرفت. در این مکان امتداد گسل‌ها عمود بر رودخانه بوده و آیینه گسل به سمت سراب حوضه است فعالیت‌های گسل اوج–حلب و شاخه‌های فرعی آن، منجر به فراخاست یک توده مقاوم عمود بر قزل‌اوزن شده و سبب تغییر رفتار رودخانه از خط در سطح (ژئونرون بیجار) به فرسایش در خط (نرون ماه‌نشان) شده است. هرچند تراکم سلول‌های اثرگذار در دبی قزل‌اوزن در پایاب متمرکزتر هستند ولی پراکندگی آن‌ها در بخش‌های دیگر به‌نوعی باعث تقویت دبی رودخانه شده است. وجود ژئونرون‌های بیجار و زنجان شرایط کاهش دبی و خشک شدن رودخانه را در فصول گرم سال فراهم می‌کنند ولی سلول‌های اثرگذار برودتی و رطوبتی وابسته به سلول‌های ژئومورفیکی، تغذیه مناسب رودخانه را فراهم نموده و از خشک شدن آن جلوگیری می‌کنند. از طرفی دیگر هرچند مساحت کمی از حوضه موردمطالعه بالاتر از برف مرز دائمی گذشته قرار داشته اما نکتهٔ قابل‌تأمل این است که در بهار علاوه بارش دریافتی فصل، ذوب برف ارتفاعات نیز موجب افزایش مقدار جریان رودخانه‌های سرچشمه گرفته از مناطق مرتفع شده و دبی رودخانه را افزایش می‌دهد. به عبارتی هرچند مناطق بالاتر از ارتفاع برف مرز دائمی این حوضه وسعت کمی دارند ولی با تزریق آب ناشی از ذوب بارش‌های جامد به قزل‌اوزن جان دوباره می‌بخشند (شکل ۸).

یکی دیگر از عواملی که بر رفتار آشوبناک قزل‌اوزن اثر می‌گذارد قرارگیری کمربند مارنی–نمکی در کنار رودخانهٔ قزل‌اوزن است. گنبدهای نمکی شناسایی‌شده در اطراف ژئونرون‌ها به‌نوعی می‌تواند ناشی از فرسایش ناشی از تخلیه ماده و انرژی ژئونرون‌ها باشد؛ اما نمی‌توان نیروی دیاپیریسم را نادیده گرفت. گنبدهای نمکی کوه کبود، اصانلو، چهرآباد از نوع فرسایش ناشی از تخلیه ماده و انرژی بسیار تأثیر پذیرفته‌اند (شکل ۹). گنبدهای نمکی دوزکند که از آن به‌عنوان طاقدیس نمکی یاد می‌شود کمتر از این پدیده متأثر شده است چون خود به‌مانند طاقدیسی بوده که توده‌های نفوذی در آن نشان از تأثیرات تکتونیک و دیاپیر دارند. در شکربلاغی نیز چون منطقه مانند ناهمواری‌های شبه آپالاشی است نمی‌توان نقش فرسایش را در خارج کردن منطقه از محیط دریایی نادیده گرفت.

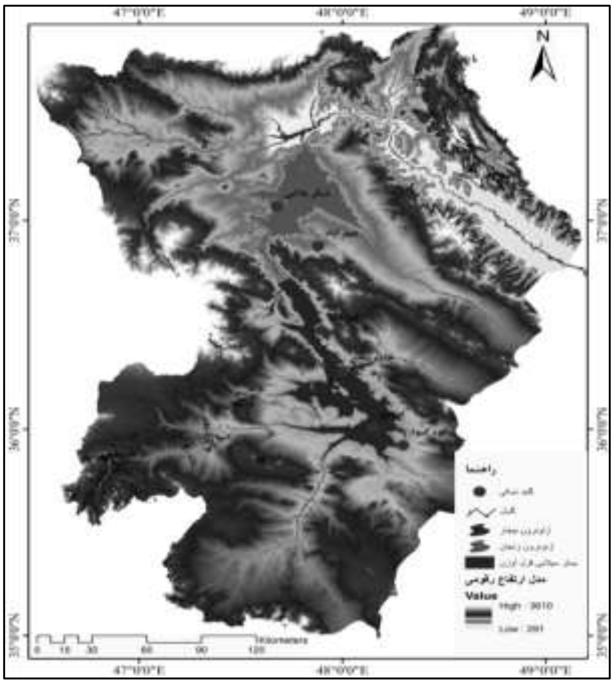


شکل ۸- سلول‌های لیتولوژیک (الف)، سلول‌های تکتونیکی (ب)، سلول‌های بارشی (ج)، سلول‌های دمایی (۷).



شکل ۹- نمای از گنبدهای نمکی شناسایی شده در منطقهٔ موردمطالعه

در تمام گنبدهای نمکی، تأثیر گسل مشهود است. قسمت جنوبی کوه کبود شیب زیادی دارد کـه ناشـی از انطبـاق آن بر آینهٔ گسل است. گنبد نمکی اصانلو موازی با گسل رخنمـون دارد. گسـل حلـب در رخنمـون نمـک بهصـورت بالشتکها و جوشهای نمکی متعددی نقش داشته است. فرسایش ناشی از تخلیه ماده و انرژی ژئونرون بیجـار حجـم زیادی از رسوبات را از بین برده است. گسل یادشده در امتـداد کـوه نمکـی دوزکنـد قرارگرفتـه اسـت. گنبـد نمکـی چهرآباد و شکربلاغی از این قضیه مستثنا نیست چون گسلهای متعددی منطقه را پوشش میدهند که عامـل تکتونیـک را تداعی میکنند. درکل گنبدهای نمکی در قـزلاوزن از نـوع کمعمـق بـوده کـه عمقشـان بـه ۱۰۰۰ متـر نمیرسـد. ژئونرونهای موجود با تأثیراتی که بر تغییرات سطح اساس داشتهاند به بالاآمدگی و رخنمـون گنبـدهای نمکـی کمـک بسیاری نموده است. نقش کوه کبود و اصانلو در شـکلگیری رودخانـهٔ شـورچای، دوزکنـد، چهرآبـاد و تلخـهرود در شکلگیری معدن نمک، دال بر جوان بودن فعالیتهای نمکی آنها است. در امتـداد جـاده بیجـار بالشـتکهای نمکـی تأثیر کمی در شوری آب داشته و با توجه به عمق کم گنبدهای نمکی منطقه بهاحتمالزیاد، گنبد نمکـی ایـن منطقـه در مراحل اولیه رخنمون قرار دارند. نتیجه اینکه اکثر نظریههای موجود درباره گنبدهای نمکی به دیاپیر و تکتونیـک اشـاره میکنند؛ اما سخن مهم در مورد گنبدهای نمکی قزلاوزن این است کـه علـاوه بـر دیـاپیر و تکتونیـک کـاوش و حفـر رودخانههای حوضه قزلاوزن براثر انحراف، اسارت و از بین رفتن ژئونرونهای مستقل در طـی کـواترنری، در برونـزد گنبدهای نمکی نقش بسزایی داشته است (شکل ۱۰)(جدول ۳).



شکل ۱۰- کمربند نمکی قزلاوزن

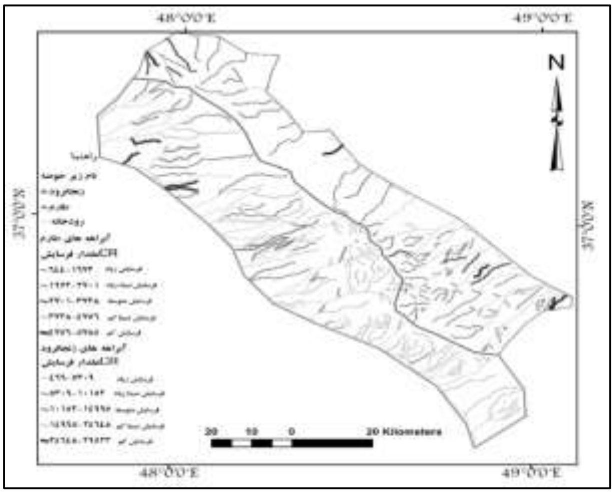
جدول ۳- مشخصات گنبدهای نمکی شناسایی‌شده محدوده موردمطالعه.

نام گنبد نمکی	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع گنبد نمکی (متر)	حجم گنبد نمکی (مترمکعب)
کوه کبود	٤٨/٢٨	٣٥/٩٢	١٢٥	٤٩٦٥٦٥٧٩
اصانلو	٤٨/١٤	٣٦/٠٠٩	١٧٢	١٤٥٠٠١٨٧٥
جاده بیجار	٤٨/٩٩	٣٦/٢٨	٢٨	٢٣٩٤٩٣٧٥
دوزکند	٤٨/٨٩	٣٦/٥٠	٦٨٠	٢٥٢٢٦٧٢٥٠٠٠
چهرآباد	٤٧/٨٧	٣٦/٨٧	٥٨	٥٣٠٠٣١٢٥
شکربلاغی	٤٨/٦٧	٣٧/٠٦	٤٧	٨٢٩٩٧٣١٢٥

یافته‌های بختیاری (١٣٩٤) دال بر این است که فعالیت‌های نئوتکتونیکی حوضه از پایاب قزل‌اوزن در بخش طارم به سمت سراب کمتر شده است؛ بنابراین، نئوتکتونیک در کل حوضه یکسان عمل‌نکرده و بیشتر قسمت‌های پایاب حوضه را متأثر کرده است ولی بااین‌حال در روند تحولات رودخانهٔ قزل‌اوزن بی‌تأثیر نبوده است. با اعمال رابطه ضریب قهقرایی در زیرشاخه‌های رتبه یک آبراهه‌های دو طرف زنجان‌رود و طارم، میانگین به‌دست‌آمده فرسایش قهقرایی در طارم ١٦٨٩/٨٢ و در زنجان ٣٣٥٨/٥٥ است. فاصله سرچشمه آبراهه‌ها در طرف زنجان بیش از دو برابر طرف طارم است. تفسیر اعداد به‌دست‌آمده در فرمول فرسایش قهقرایی نشان‌دهنده یک رابطه معکوس می‌باشد یعنی هرچه اعداد به‌دست‌آمده بزرگ‌تر باشند مقدار فرسایش قهقرایی کمتر می‌باشد زیرا که سرچشمه آبراهه فاصله بیشتری از خط تقسیم آب داشته و فرسایش قهقرایی کمتری بر آن تسلط دارد. در مقابل هر چه عدد به‌دست‌آمده کوچک‌تر باشد به معنی فاصله کمتر آبراهه از خط تقسیم آب و غلبه بیشتر فرسایش قهقرایی است. تخلیه خطی ماده و انرژی طارم، شرایط را برای عقب رفتن بیشتر آبراهه‌ها فراهم کرده است. آنچه باعث تغییر لندفرم‌ها شده است بیشتر ناشی از تغییر سطح اساس بستر قزل‌اوزن در طی کواترنری و فرسایش شدید خطی آن نسبت به ژئونرون زنجان بوده است. افزایش فرسایش عمقی (خطی) در قسمت طارم بر اثر حجم زیاد تخلیه ماده و انرژی منجر به حفر بیشتر آبراهه‌ها و افزایش مقدار فرسایش قهقرایی شده است (جدول ٤)(شکل ١١).

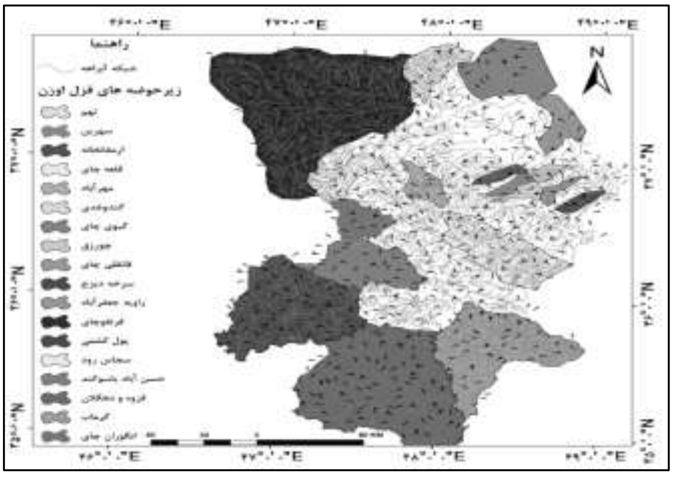
جدول ٤- مقدار فرسایش قهقرایی در دو طرف زنجان‌رود و قزل‌اوزن طارم

نام حوضه	میانگین مقدار فرسایش قهقرایی (متر)	اختلاف فرسایش قهقرایی با حوضهٔ قرینه (متر)
چورزق	١٩٦٦/٩٩	٢٢٠١/٣٧
ارمغان خانه	٤١٦٨/٣٧	
قانقلی‌چای	١٥٤٢/٥٣	١٨٣٧/٧٥
سهرین	٣٣٨٠/٢٩	
سرخه دیزج	١٥٥٩/٩٥	١٠٤٨/٠٥
تهم	٢٦٠٨	



شکل ۱۱- کلاس‌بندی فرسایش قهقرایی در آبراهه‌های دامنه شمالی و جنوبی ارتفاعات شمالی زنجان.

بعد فرکتالی بر اساس رابطه (٤) برآورد گردید (جدول ۵). عدد ۲ بعد فرکتال زیرحوضه‌های قزل‌اوزن، حاکی از شرایط عدم تعادل در کل حوضه است. بعد فرکتال بین ۱ و ۲ یا کوچک‌تر از ۲ ضریب انشعاب زیاد حوضه را نسبت به مساحت نشان می‌دهد و دال بر ظرفیت تشکیل شاخه‌های فرعی در سراب حوضه است. رابطهٔ بین بعد فرکتال نسبت انشعاب با مساحت، معکوس و منفی است. حوضه‌هایی با بعد فرکتالی باالا مساحت کم و با بعد فرکتال کم، مساحت زیاد دارند. بعد فرکتال زیرحوضه قانقلی‌چای، قلعه‌چای، مهرآباد، قرنقوچای، گندوغدی، گیوی، زاویه جعفرآباد، تهم، سهرین، سرخه دیزج و یول کشتی بین ۱ تا ۲ است که حاکی از فرکتال خط در سطح است. بعد فرکتالی بیشتر از ۲ زیرحوضه‌های قروه-دهگلان، انگوران چای، گرماب، سجاس‌رود، حسن‌آباد یاسوکند، ارمغانخانه و چورزق نشان‌دهنده فرکتال بیشتر در سطح است (شکل ۱۲).

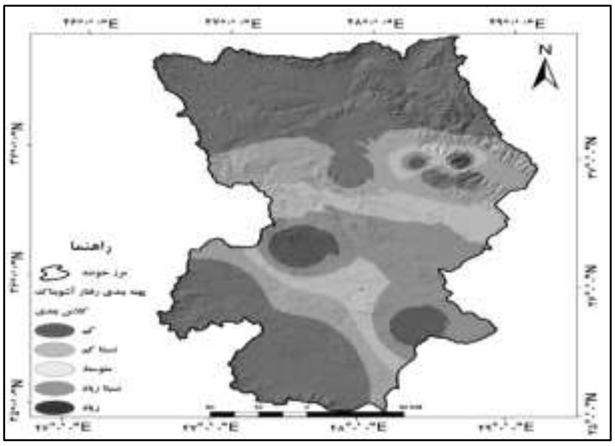


شکل ۱۲- رتبه‌بندی آبراهه‌های قزل‌اوزن

جدول ۵- مشخصات هیدرو مورفومتری و بعد فرکتالی زیرحوضه‌های قزل‌اوزن.

پارامتر	قلعه‌چای	مهرآباد	سرخه دیزج	قرنقوچای	گندوغدی	گیوی
نسبت انشعاب Km	۷/۷۵	٤/٦٨	٤/٤٢	١٦/٣١	١١/٣٣	٣/٦٨
نسبت طول رودخانه Km	٧/٤٥	٢/٢٨	٢/٢٩	٨/٧٤	٦/٢٢	٢/٩٢
مساحت Km2	٨٠٤/١٤	٥٣٠/٠٩	٢٢٥/٨٤	٨٥٨٣/٦٥	٩١٠/٧٦	١٩٢٠/٥٣
بعد فرکتالی	١/٠١	١/٨٦	١/٧٨	١/٣٢	١/٣٢	١/٢١٤
پارامتر	**زاویه جعفرآباد**	**تهم**	**سهرین**	**ارمغانخانه**	**چورزق**	**قانقلی‌چای**
نسبت انشعاب Km	٢/٨٣	٦/٥٤	٧/٦٧	٥/١٦	٣/٣	٣/٣
نسبت طول رودخانه Km	٢/٣٦	٤/٨٧	٦/٨٦	١/٦٧	١/٤٠	١٠/٦٦
مساحت Km2	٧٠٥/٣٤	٢٠٧/٤٣	٢١٧/٥٦	٢٠٦/٧٥	١٧١/٢٦	١٨٣/٤٢
بعد فرکتالی	١/٢١١	١/١٨	١/٠٥	٣/٢٠	٣/٤٨	٠/٧٨
پارامتر	**انگوران چای**	**حسن‌آباد یاسوکند**	**یول کشتی**	**قروه و دهگلان**	**گرماب**	**سجاس‌رود**
نسبت انشعاب Km	١١/٠٦	٩/٠١	٨/٧٣	٩/٥٤	٦/٣٩	٦/٣٦
نسبت طول رودخانه Km	٣/٩٧	١/٣١٥	٥/٧	٨/١٤	١/٩٤	١/١٣
مساحت Km2	٧٨٨	١٧٩٠	٤١٨٣	٦٧٢١	٣٥٥٤	٢٠٨٤
بعد فرکتالی	٢/١٢	٣/٢٥	١/٢٤	١/٠٧	٢/٧٩	٢/٢٤

بعد از مشخص ساختن بعد فرکتالی ۱۸ زیرحوضه قزل‌اوزن با استفاده از میانیابی IDW و Kriging بعد فرکتالی کل حوضه به دست آمد و پهنه‌بندی کلاس رفتار آشوبناک انجام شد. این پهنه‌بندی شامل ۵ کلاس رفتار آشوبناک کم، نسبتاً کم، متوسط، نسبتاً زیاد و زیاد می‌باشد. همان‌گونه که مشخص است سرچشمه قزل‌اوزن و بیشتر سرشاخه‌های آن دارای رفتار آشوبناک کم می‌باشد یعنی این مناطق در حالت تعادل به سر می‌برند اما با توجه به نتایج به‌دست‌آمده مرکز حوضه بیشترین رفتار آشوبناک و ناتعادلی را دارد (شکل ۱۳).



شکل ۱۳- پهنه‌بندی رفتار آشوبناک حوضه آبریز قزل‌اوزن.

۵. جمع بندی

تعادل و عدم تعادل حوضه‌های آبی وابسته به پایداری پارامترهایی است که گاه به‌اشتباه با توجه بـه شـرایط کنـونی تجزیه‌وتحلیل می‌گردند. سـطح اسـاس یـک رودخانـه و سرشـاخه‌هایش یکـی از مهم‌تـرین پارامترهـایی اسـت کـه تجزیه‌وتحلیل حوضه‌های زهکشی بدون در نظر گرفتن آن‌هـا امکان‌پـذیر نیسـت. زمـانی کـه گفتـه می‌شـود یکـی از ویژگی‌های مهم دوره کواترنری تغییر سطح اساس رودخانه‌هاست به این معنی نیست که تغییر سطح اساس فقـط بایـد بر اساس سطح اساس امروزی رودخانه بررسی گردد. وجود تنگ‌های متعـدد در قـزل‌اوزن دال بـر آن اسـت کـه ایـن حوضه ژئونرون‌های مستقلی داشته است. در این‌گونه مناطق هرچند وحدت خاصـی در سـاختمان ناهمواری‌هـا دیـده نمی‌شود و ناهمواری‌ها ترکیبـی از هورسـت، آتش‌فشـان و رسـوبات چین‌خـورده اسـت ولـی درمجمـوع رودخانـه قزل‌اوزن عمود بر امتداد ناهمواری‌ها جریان داشته و محور آن‌ها را قطع کرده است. حوضه آبی بیجار با وسـعتی بـیش از ۲٤۸۰۰ کیلومترمربع، در داخل خود شواهدی دارد که حـاکی از اسـتقلال حوضـه در اوایـل کـواترنری بـوده اسـت. سطوح اساس محلی از طریق تراس‌های رسوبی شناسـایی گردیـد. بـه‌این‌ترتیب در ژئـونرون بیجـار سـطوح تراکمـی حسن‌آباد یاسوکند، مسجدلر و گرماب شناسایی شدند. همچنین در این چالـه اسـارت‌ها و انحراف‌هـای ٦ زیرحوضـه شناسایی شد. دومینویی که در قزل‌اوزن از آن بحث می‌شود بیشتر بر اثرات تغییر سطوح اساس بـر محـیط تأکیـد دارد. دومینوی تغییرات سطح اساس به دو نـوع درون حوضـه‌ای و بـرون حوضـه‌ای عمـل می‌کنـد. وقتـی سـطح اسـاس رودخانه‌ای تغییر می‌کند تغییرات از مصب تـا سرچشـمه را متـأثر می‌سـازد. نمونـه چنـین واکنشـی تسـلط فرسـایش قهقرایی در حوضه است. بیشترین تأثیر تغییر سطح اساس برون حوضه‌ای در لنـدفرم‌های نزدیـک بـه محـل خروجـی حوضه اتفاق می‌افتد. واکنش تغییر سطح اساس در لندفرم‌ها به سه صورت خطـی، خـط در سـطح متقـارن و خـط در سطح نامتقارن است. اثر تغییر سطح اساس برون حوضه‌ای در رسوبات آبرفتی، معمولـاً به‌صـورت خطـی و بـه شـکل پادگانه‌های رودخانه‌ای منعکس می‌گردد. درصورتی‌که تغییر سطح اساس به حدی باشد کـه آب بـه سنگ‌بسـتر برسـد نحـوه عکس‌العمـل محـیط، بـه پارامترهـای همچـون لیتولـوژی سنگ‌بسـتر و وضـعیت شـیب توپـوگرافی و شـیب زمین‌شناسی وابسته می‌شود. سلول‌های مختلف در حوضه قزل‌اوزن از سراب تا پایاب در جهت پویایی ایـن رودخانـه توزیع متناسبی دارد. توزیع سلول‌های اثرگذار برودتی و رطوبتی وابسـته بـه سـلول‌های ژئومـورفیکی، شـرایط تغذیـه مناسب رودخانه را فراهم نموده و از خشک شدن آن جلوگیری می‌کنند. بررسـی‌های میـدانی حـاکی از آن اسـت کـه شواهد اسارت یا انحراف به‌صورت تغییر مسیر رودخانـه بـا زاویـه ۹۰ درجـه یـا بـیش‌تـر، وجـود رسـوبات آبرفتـی درشت‌دانه در سراب رودخانه‌ها، فاقد آبراهه قابل‌توجه بودن و مساحت ناچیز یک‌طرف رودخانه، تفاوت ارتفـاع زیـاد همراه با طول آبراهۀ کمتر و وجود رسوبات آبرفتی دیاژنز نشده در خط تقسیم آب و منحنی‌های بـا پالس‌هـای عمیـق یا سینوس‌های عمیق در بین و پایین‌دست منحنی‌های صاف تا سینوسی ساده در لیتولوژی‌هـای همگـن قابل‌ردیـابی و

شناسایی است. گسترش و فراوانی لندفرمها با فرکانس تغییر سطح اساس نسبت عکس دارد؛ هرچه تعداد تغییر سطح اساس منطقه‌ای بیشتر باشد، لندفرم‌های متعدد با ابعاد کوچک باقی می‌مانند؛ لندفرم‌های بزرگ‌تر متعلق به مکان‌هایی است که تعداد تغییرات کمتر باشد. در چنین مناطقی هرچند لندفرم‌های کمتری به وجود می‌آیند ولی سطوح بزرگ‌تر و وسیع‌تری به خود اختصاص می‌دهند. بر همین اساس ناتعادلی فرم‌های منطقه دال بر تعدد تغییر سطح اساس است. عدم وجود پادگانه‌های آبرفتی عریض و ممتد در قزل‌اوزن دال بر تعدد تغییر سطح اساس این رودخانه است. اکثر نظریه‌های موجود درباره گنبدهای نمکی به دیاپیر و تکتونیک اشاره می‌کنند؛ اما سخن مهم در مورد گنبدهای نمکی قزل‌اوزن این است که علاوه بر آن‌ها کاوش و حفر رودخانه‌های حوضه قزل‌اوزن و انحراف و اسارت سرشاخه‌های آن درمجموع باعث از بین رفتن ژئونرون‌های مستقل و برونزد گنبدهای نمکی شده است.

کتابنامه

انیس حسینی، مسعود، ذاکر مشفق، محمد؛ ۱۳۹۲. تحلیل و پیش‌بینی جریان رودخانه کشکان با استفاده از نظریه آشوب. *مجله علمی-پژوهشی هیدرولیک*. دوره ۸. شماره ۳. صص ٤٥-٦١.

آقانباتی، سید علی؛ ۱۳۸۳. زمین شناسی ایران. انتشارات سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور. ص ۷۰۸.

بربریان، مانوئل؛ قرشی، منوچهر؛ ۱۹۸٤. نوزمین ساخت، لرزه زمین ساخت و خطر گسلش لرزه زا در منطقه احداث کارخانه ذوب سرب و روی زنجان. سازمان زمین شناسی کشور. تهران.

پورکرمانی، محسن و آرین، مهران؛ ۱۳۷۸. تحلیل ساختاری گسل حلب. *سومین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران*. ص ۳. تهران.

خسروی، عذرا؛ سپهر، عادل؛ عبدالله زاده، زهرا؛ ۱۳۹۵. رفتار فرکتالی و ارتباط آن با خصوصیات هیدرو مورفومتری حوضه‌های آبریز دامنهٔ شمالی بینالود. *هیدروژئومورفولوژی*. شماره ۹. صص ۲۰-۱. تبریز.

داداش زاده، زهرا؛ مختاری، لیلاگلی؛ آراء، هایده؛ ۱۳۹۳. کیاس فرسایشی و تحولات پیش‌بینی‌نشده چاله اردبیل. *مجلهٔ جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*. سال ۲۵. پیاپی ۵۵. شماره ۳. صص ۲٤۲-۲۳۱.

دریو، ماکس؛ ۱۳۹۰. مبانی ژئومورفولوژی. ترجمه خیام. مقصود؛ انتشارات مبنا. تبریز.

رامشت، محمد حسین، شاه زیدی، سمیه سادات؛ ۱۳۹۰. *کاربرد ژئو مورفولوژی دربرنامه ریزی ملی، منطقه‌ای، اقتصادی، توریسم*. انتشارات دانشگاه اصفهان. چاپ دوم. ۳۹۲ ص.

رامشت، محمدحسین؛ ۱۳۷۵. *کاربرد ژئومورفولوژی در برنامه‌ریزی ملی- منطقه‌ای*. انتشارات دانشگاه اصفهان. چاپ اول. اصفهان.

رامشت، محمدحسین؛ ۱۳۸۲. نظریه کیاس در ژئومورفولوژی. *فصلنامه جغرافیا و توسعه*. ۱(۱)، ۳٦-۱۳.

رضایی مقدم، محمدحسین، ثروتی، محمدرضا، اصغری سراسکانرود، صیاد؛ ۱۳۹۰. بررسی مقایس‌های الگوی پیچانرود با استفاده از تحلیل هندسه فراکتالی و شاخص‌های زاویه مرکزی و ضریب خمیدگی مطالعه موردی: رودخانه قـزل اوزن. *پژوهش نامه مدیریت حوضه آبخیز*. سال دوم. شماره ۳. صص ۱۸ – ۱.

سید جوادین، سید رضا، امیرکبیری، علیرضا؛ ۱۳۸٤. مروری جامع بر نظریه‌های مدیریت و سازمان. *نگـاه دانـش*. جلـد اول.

شقاقیان، محمود رضا؛ بیدختی، ناصرطالب؛ ۱۳۸۸. بررسی وجود آشوب در جریان رود در مقیاس‌های زمانی گوناگون. *مجله مهندسی آب*. سال ۲. صص ۸-۱.

عملی زاده، هیوا، شایان، سیاوش؛ ۱۳۹۰. نظریه آشوب در ژئومورفولوژی جریانی. مطالعه مـوردی تغییـرات بسـتر رود کل. هرمزگان. *مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*. سال ۲۵. پیاپی ۵۵. شماره ۳. صص ۲۳۰-۲۱۷.

عملی زاده، هیوا، ماه‌پیکر، امید، سعادتمند، مریم؛ ۱۳۹۳. بررسی نظریه فرکتال در ژئومورفولوژی رودخانه‌ای: مطالعـه‌ی موردی زرینه‌رود. *مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*. سال سوم. شماره ۲. صص. ۲٤۱-۱۳۰.

فهیم فرد، سارا، شمسایی، ابوالفضل، فتاحی، محمدهادی، فرزین، سعید؛ ۱۳۹٤. بررسی تـأثیر سـد بـر الگـوی آشـوبی انتقال بار معلق رود مطالعه موردی: سد کرج. *مجله مهندسی آب*. سال هشتم. صص ۸۹-۱۰۰..

قاهری، عباس؛ قربانی، محمدعلی؛ دل افروز، هادی؛ ملکانی، لیلا؛ ۱۳۹۱. ارزیابی جریان رودخانه بـا اسـتفاده از نظریـه آشوب. *مجله پژوهش آب ایران*. سال ٦. شماره ۱۰. صص ۱۸٦-۱۷۷.

کرم، امیر؛ ۱۳۸۹. نظریهٔ آشوب. فرکتال. برخال؛ و سیستم‌های غیرخطی در ژئومورفولوژی. *فصل‌نامه جغرافیای طبیعـی*. سال سوم. شماره ۸. صص ۸۲-٦۷.

محمودی، فرج الله؛ ۱۳۵۲. جغرافیای ناحیه‌ای قروه. بیجار. دیواندره. انتشارات دانشگاه تهران. طرح پژوهشی کردستان. نشریه شماره ۹. ص ۱۸٤.

Ariza.V. A, Jiménez-Hornero. F., Gutiérrez de Rave. E., 2013, Multi-fractal analysis applied to the study of the accuracy of DEM-based stream derivation, Geomorphology, Volume 197, 85-95.

Baas, A.C.W, 2002. Chaos, fractals and self-organization in coastal geomorphology: simulating dune landscapes in vegetated environments. Geomorphology 48, 309 – 328.

Bi, L., He, H., Wei, Z., Shi, F., 2012. Fractal properties of landform in the Ordos Block and surrounding areas, China. Geomorphology, 175, 151–162.

Dombrádi. E, Timár.G, Bada.G, Cloetingh. S, Horváth. F., 2007. Fractal dimension estimations of drainage network in the Carpathian–Pannonian system, Global and Planetary Change, No 58, Pp 197–213.

Frascati. A and Lanzoni.S., 2010. Long-term River meandering as a part of chaotic dynamics? A contribution from mathematical modelling, Landforms No. 35, Pp 791–802.

Jianhua, X. Yaning, C. Weihong, L. Minhe, J. Shan, D., 2009. The complex nonlinear systems with fractal as well as chaotic dynamics of annual runoff processes in the three headwaters of the Tarim River, Geogr Sci, No. 19, Pp 25-35.

Milliman. J. D, Syvitski J. P. M., 2013. Geomorphic/Tectonic Control of Sediment Discharge to the Ocean: The Importance of Small Mountainous Rivers, the Journal of Geology, Vol. 100, No. 5, Pp. 525-544.

Nicolis, C., 1987. Long-term climatic variability and chaotic dynamics, Journal Dynamic Meteorology and Oceanography, Vol 39, Issue 1, Pp 1-9.

Pedersen, G. B. M., & Head, J. W., 2011. Chaos formation by sublimation of volatile-rich substrate: Evidence from Galaxias Chaos, Mars. Icarus, 211(1), 316-329.

Phillips, J. D., 1993. Interpreting the fractal dimension of river networks. Fractals in geography, 7, 142-157.

Phillips, J. D., 2006. Deterministic chaos and historical geomorphology: a review and look forward. Geomorphology, 76(1), 109-121.

Tsonis, A. A., 1989. Chaos and unpredictability of weather, Weather, Vol. 44, P 258–263.

Turcotte, D.L., 1992. “Fractal and Chaos in Geology and, Geophysics”, Geophysics Combridge University Press, Combridge, P 121.

Turcotte, D.L., 2007. “Fractal and Chaos in Geology and, Geophysics”, Geophysics Combridge University Press, Combridge, P 121.

Zhou. Y, Ma, Z. Wang, L., 2002. Chaotic dynamics of flood series in the Huaibei River Basin for the last 500 years, journal of Hydrology, no 258, Pp 100-110.